

**В.Е. Зуев, А.С. Селиванов, В.В. Фомин,
А.С. Панфилов, А.В. Романов, С.В. Афонин,
В.И. Хамарин**

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА АППАРАТУРОЙ МСУ-СК СО СПУТНИКА «КОСМОС—1689»

Рассматриваются результаты испытаний инфракрасного канала аппаратуры МСУ-СК, проведенных на ИСЗ «Космос—1689». Измерения уходящего излучения в диапазоне спектра 10,4–12,6 мкм были использованы для восстановления температуры поверхности океана.

Показано, что при использовании методики расчета характеристик ИК излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность», разработанной в Институте оптики атмосферы СО АН СССР, по измерениям аппаратуры МСУ–СК можно восстановить температуру поверхности океана с погрешностью менее 1°.

В 1985–1986 гг. на ИСЗ «Космос – 1689» были проведены испытания аппаратуры МСУ–СК [1] с целью изучения возможностей ее использования для измерений уходящего излучения в видимом и инфракрасном диапазонах спектра и восстановления на основе этих данных температуры подстилающей поверхности.

Аппаратура имеет четыре канала в видимой области спектра и инфракрасный канал в диапазоне 10,4–12,6 мкм. Коническое сканирование аппаратуры под углом 39° обеспечивает при высоте орбиты в 650 км полосу обзора на местности шириной 600 км. Пространственное разрешение на местности составляет около 600 м.

Для учета искажающего влияния атмосферы на результаты спутникового зондирования температуры подстилающей поверхности нами была использована разработанная в Институте оптики атмосферы СО АН СССР методика расчета характеристик ИК излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность» [2, 3]. В рамках данной методики искомое значение температуры подстилающей поверхности (T_0) определяется из решения интегрального уравнения переноса ИК излучения через атмосферу:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \delta(\lambda, \theta) B(T_0, \lambda) P(\lambda, \theta) d\lambda = J_{\text{эксп}} - J_{\text{атм}} - J_{\text{отр}}, \quad (1)$$

где $\lambda_1 = 10,4$ мкм; $\lambda_2 = 12,6$ мкм – границы спектрального диапазона; $\theta = 39^\circ$ – угол визирования аппаратуры МСУ-СК; $\delta(\lambda, \theta)$ – коэффициент излучения (излучательная способность) подстилающей поверхности; $B(T_0, \lambda)$ – интенсивность излучения подстилающей поверхности, вычисляемая по формуле Планка; $P(\lambda, \theta)$ – функция пропускания атмосферы по трассе зондирования T_0 ; $J_{\text{атм}}$ – интенсивность собственного излучения атмосферы; $J_{\text{отр}}$ – интенсивность отраженного подстилающей поверхностью противозлучения атмосферы; $J_{\text{эксп}}$ – измеряемая на спутнике интенсивность теплового излучения системы.

При решении уравнения (1) учитывается сферичность атмосферы и подстилающей поверхности.

В основе моделирования функций пропускания атмосферы используются методы полинейных расчетов характеристик молекулярного поглощения тепловой радиации [4] и концепции теории поглощения света крыльями спектральных линий атмосферных газов [5]. Для расчета коэффициентов молекулярного поглощения привлекаются современные данные о параметрах спектральных линий полос поглощения атмосферных газов [6].

Описанная выше методика реализована в виде быстродействующего программного комплекса на ЭВМ ЕС–1055, который был непосредственно использован для атмосферной коррекции данных, полученных с помощью аппаратуры МСУ–СК со спутника «Космос–1689».

В настоящей работе представлены результаты восстановления температуры поверхности океана (ТПО) в районе северо-западного побережья Африки и Канарских островов, а также в районе северо-восточного черноморского побережья Кавказа.

Алгоритм определения температуры поверхности океана состоял из следующих этапов:

1. Дешифрирование безоблачных участков водной поверхности на основе совместного анализа радиометрических данных, полученных в видимом и инфракрасном диапазонах (рис. 1, 2). На рис. 1, 2 четко прослеживаются контуры береговой линии и облачности, что позволяет надежно решить задачу дешифрирования безоблачных полей ТПО и осуществить географическую привязку полученных данных.



Рис. 1. Снимок в видимой области спектра северо-западного побережья Африки



Рис. 2. Снимок в инфракрасной области спектра северо-западного побережья Африки

II. Выбор метеорологической информации, описывающей состояние атмосферы в районах зондирования ТПО.

В качестве метеорологической информации были использованы данные радиозондирования с ближайших к району зондирования станций. Расстояние между районом зондирования и станциями не превышало 500 км.

Для задания вертикального распределения O_3 , CO_2 , N_2O , CH_4 в атмосфере были использованы работы [7, 8].

С целью уменьшения ошибок интерпретации результатов спутникового зондирования ТПО, обусловленных заданием метеорологической информации (главным образом температуры и влажности), были использованы методы пространственной интерполяции параметров состояния атмосферы с учетом синоптической обстановки в районе зондирования. Анализ синоптических данных в районе Канарских островов выявил две характерные области — северную и южную с границей по 29° с.ш. Для каждой из этих областей на основе результатов радиозондирования были заданы вертикальные профили температуры и влажности, описывающие метеорологическое состояние атмосферы.

III. Оценка влияния ошибок задания профилей температуры и влажности на результаты атмосферной коррекции данных дистанционных измерений ТПО аппаратурой МСУ—СК на основе численного моделирования для всех атмосферных ситуаций, сложившихся в районах зондирования ТПО. По нашим оценкам, ошибки задания вертикальных профилей температуры и влажности составляют около 1° и 10%, что приводит согласно данным таблицы к ошибкам восстановления ТПО, не превышающим $0,75^\circ$. Погрешность определения ТПО, обусловленная ошибками задания спектроскопической информации (используемой нами при расчете функций пропускания атмосферы), как видно из таблицы, не превышает $0,55^\circ$.

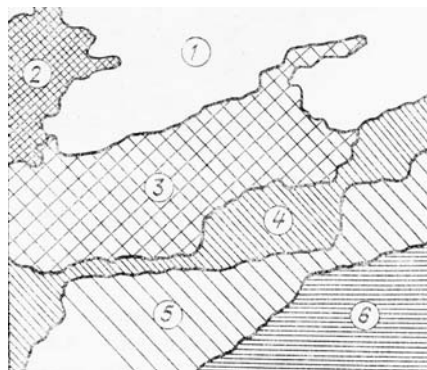


Рис. 3. Пространственная структура поля измеренных со спутника радиационных температур: 1 — меньше 12° (облака); 2 — $15,5^\circ \pm 6,0^\circ$; 3 — $15,0^\circ \pm 15,5^\circ$; 4 — $14,5^\circ \pm 15,0^\circ$; 5 — $14,0^\circ \pm 14,5^\circ$; 6 — больше 18° (берег)

Таким образом, погрешность атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования ТПО может составлять в нашем случае величину порядка 1° и менее.

IV. Построение карт радиационных температур (пример которой представлен на рис. 3) и атмосферная коррекция данных дистанционного зондирования ТПО на основе решения уравнения (1) с использованием полученной метеорологической информации и данных работы [9] по угловой и спектральной зависимости коэффициента излучения водной поверхности.

По описанному выше алгоритму была проведена атмосферная коррекция данных спутникового зондирования ТПО в двух указанных районах, результаты которой для семи безоблачных участков водной поверхности представлены в таблице.

В той же таблице приведены результаты сопоставления восстановленных значений ТПО (T_c) с данными судовых наблюдений температуры поверхности океана (T_k), снятых с метеорологических карт. Таким образом, нами проводилось сопоставление восстановленной по спутниковым данным температуры верхней холодной пленки воды, имеющей толщину менее 50 мкм, и температуры воды, измеренной контактным способом на глубинах 0,5–1 м. Поэтому возникает вопрос о сопоставимости этих двух типов данных.

Результаты обработки данных радиометрических измерений ТПО в инфракрасном канале МСУ-СК с ИСЗ «Космос – 1689». T_k и T_c – корабельные и восстановленные спутниковые значения ТПО (°С), T_r – измеренные радиационные температуры (°С), $\delta T_0 = T_k - T_c$, $\delta T'$ и $\delta T''$ – погрешность восстановления ТПО за счет ошибок в оптических параметрах радиационной модели и метеорологической информации (°С)

Географический район	T_r	T_k	T_c	δT_0	$\delta T'$	$\delta T''$
Атлантический океан	14,0	17,0	16,7	+0,3	0,55	0,65
	15,5	18,0	18,8	–0,8		
	16,5	20,0	20,2	–0,2		
	14,0	16,5	17,5	–1,0	0,50	0,60
Черное море	16,5	19,6	18,6	+1,0	0,52	0,75
	16,5	19,0	19,0	0,0		
	17,0	20,5	20,0	+0,5		

Согласно имеющейся у нас метеорологической информации скорость ветра в районах зондирования была около 5 м/с. При такой скорости ветра по данным работы [10] различие между температурой холодной пленки и температурой на глубинах 0,5–1 м составляет величину порядка 0,1°, что позволяет сопоставлять их значения при оценке точности дистанционного восстановления ТПО.

Визуальный анализ карт радиационной температуры в районах, судовых наблюдений выявил локально-однородные области с постоянной радиационной температурой, что упростило процедуру пространственного согласования наблюдений. Асинхронность спутниковых и судовых наблюдений не превышала 1 часа, что с учетом локальной однородности полей температуры воды не могло привести к существенным ошибкам сопоставления этих двух видов наблюдений. Таким образом, возможные ошибки сопоставления наблюдений из-за их пространственно-временного рассогласования, а также измерительных ошибок составляют по нашим оценкам несколько десятых градуса.

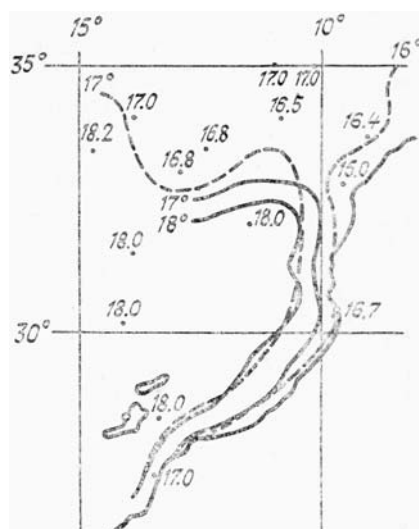


Рис. 4. Температура поверхности океана в районе северо-западного побережья Африки, построенная по данным судовых (штриховые линии) и спутниковых (сплошные) измерений ТПО

Как видно из таблицы, результаты восстановления температуры поверхности воды, по данным измерений аппаратуры МСУ-СК, находятся в хорошем согласии со стандартными судовыми наблюдениями, отклонения $\delta T_0 = T_c - T_k$ не превышают по абсолютной величине 1° , что лежит в пределах полученных предварительно оценок достижимой в нашем случае точности восстановления ТПО. На рис. 4 приведена карта изотерм воды, построенная по данным спутниковых и судовых наблюдений. Несмотря на довольно сложную структуру поля температуры воды, обусловленную действием берегового апвеллинга, согласование изолиний удовлетворительное.

При этом спутниковые измерения позволяют наблюдать тонкую структуру поля температуры.

Особо следует отметить хорошее согласование изотерм в северной части анализируемого района, где четко проявляется северная граница действия берегового апвеллинга.

Таким образом, результаты обработки измерений аппаратуры МСУ – СК показали, что:

1. Разработанная в ИОА СО АН СССР атмосферная радиационная модель при наличии достоверной априорной информации о метеорологическом состоянии атмосферы позволяет восстанавливать значения температуры поверхности океана с погрешностью менее 1° ;

2. Инфракрасный канал многозонального сканирующего устройства среднего разрешения обеспечивает устойчивое измерение интенсивности тепловой радиации в диапазоне 10,4–12,6 мкм и позволяет получать на основе радиометрических измерений (после проведения высококачественной атмосферной коррекции) тонкую структуру полей температуры поверхности океана, наблюдать мелко-масштабные физические процессы взаимодействия атмосферы и океана.

1. Природа Земли из космоса. /Под ред. Н.П. Козлова. Л.: Гидрометеиздат. 1984. 152 с.
2. Гендрин А.Г., Фомин В.В. //7 Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докл.). Томск. 1982. Ч. 1. С. 144–146.
3. Афонин С.В., Гендрин А.Г., Фомин В.В. Атлас интенсивности теплового излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность Земли» в диапазоне 8–13 мкм. 1. Общие принципы построения модели для численных расчетов. Томск. 1983. 13 с. Деп. в ВИНТИ 30.02.83. № 6377.
4. Гендрин А.Г., Фомин В.В. //В кн.: Спектроскопия атмосферных газов и распространение оптических волн. Томск. 1981. С. 103–113.
5. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. – Новосибирск: Наука. 1977. 216 с.
6. Rotman L.S. //Appl. Optics. 1981. V. 20. № 5. P. 791–795.
7. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 264 с.
8. Калайда В.Т., Хамарин В.И. Среднегодовое распределение парциального давления озона в северном полушарии. Томск. 1985. 13 с. Деп. в ВИНТИ 19.02.85. № 1301-85.
9. Афонин С.В., Гендрин А.Г., Карпов А.Л., Фомин В.В. Расчет излучательной способности водной поверхности для 3,4–4 и 8–13 мкм. Томск. 1985. 18 с. Деп. в ВИНТИ 22.04.85. № 3580.
10. Гардашов Р.Г., Шифрин К.С. //Изв. АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19. № 7. С. 711–773.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
24 июня 1988 г.

V.E. Zuev, A.S. Selivanov, V.V. Fomin, A.S. Panfilov, A.V. Romanov, S.V. Afonin, V.I. Khamarin. **Sea Surface Temperature Measurements by «Kosmos-1689» Satellite-Borne Multichannel Moderate Resolution Conical Scanning Unit.**

The MMRCU infrared channel flown on the «Kosmos-1689» satellite was tested. Sea surface temperatures were obtained from the observed data on the outgoing radiation in the 10,4–12,6 μm spectral region, using a special retrieval algorithm for calculating the IR radiative characteristics of the atmosphere-underlying surface system. The satellite-derived sea surface temperatures are shown to agree within 1°C with the relevant routine ship reports.